

DOI: 10.7667/PSPC151864

# 特高压电网社会效益评估方法研究

高凡, 吴军, 刘涤尘, 汪凯, 赵语, 朱学栋

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 随着特高压电网的快速发展, 将社会效益作为经济效益一部分的传统评估方法已经不能准确评估特高压电网的社会效益。为了准确评估特高压电网的社会效益, 构建特高压电网社会效益评估模型。该模型分别构建社会成本和社会收益评估指标体系, 采用对比评估方法分别从纵向和横向两个方面评估三种方案的社会效益, 从纵向和横向两个方面进行评估能体现特高压电网的社会效益评估的科学性和特殊性。最后通过工程实例进行评估分析, 对该评估模型与方法进行验证与分析。

**关键词:** 特高压电网; 社会效益评估模型; 对比评估方法; 社会成本评估指标体系; 社会收益评估指标体系

## Research on the social benefit evaluation method of UHV power grid

GAO Fan, WU Jun, LIU Dichen, WANG Kai, ZHAO Yu, ZHU Xuedong

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** With the rapid development of UHV power grid, social benefits as part of economic benefits can not accurately assess the social benefits of UHV power grid. In order to accurately assess the social benefits of UHV power grid, social benefits assessment model is introduced. Social cost and social benefits assessment index are provided in model, from vertical and horizontal social benefits of the three options are assessed through comparative assessment methods, scientificity and particularity for social benefits of UHV can be reflected through vertical and horizontal assessment. At last, the evaluation model and method is verified and analyzed through the analysis of engineering projects.

**Key words:** UHV power grid; social benefit assessment model; comparative assessment methods; social cost evaluation index system; social income evaluation index system

## 0 引言

随着特高压电网快速发展, 对其运行因素<sup>[1]</sup>进行分析并对特高压电网进行经济社会效益评估, 有利于指导特高压电网的规划与建设。目前, 特高压电网的经济效益评估主要采用工程经济学中基于折现现金流的方法, 通过净现值法、内部收益率法和投资回收期法等计算相关经济指标, 根据各方案的收益与成本进行比选进行经济效益评估<sup>[2-3]</sup>, 文献[4]基于非序贯蒙特卡洛法模拟冰灾发生与否、结冰持续时间长短和线路失效与否, 通过最优潮流计算方法计算线路在全寿命周期内的成本进行经济性评估, 文献[5]通过构建特高压输电模型并对其进行经济性分析, 对传统电网经济效益评估起到补充。

当前研究当中, 对于工程项目的经济评价体系已基本成熟, 但目前通用的经济评价方法同时包括经济效益评估和社会效益评估, 或者将社会效益指

标和内容归属于间接性的经济效益, 这样的评估具有一些明显不足: 首先是涉及社会效益的相关指标不够全面, 无法全面衡量工程的社会效益及其影响; 二是对社会效益评估指标的选取无法区分其中的收益部分与投入部分, 因此难以做到准确评价; 三是针对特高压工程项目, 其社会效益有其特殊性, 部分评估指标不适宜于采用经济性评价方法来评估; 四是在当前经济建设的环境友好及可持续发展的大背景下, 对于新增工程项目的节能减排、减少城市雾霾、降低 PM2.5 等方面提出了更高要求, 因此单纯的经济效益评价已经无法满足全面正确评估特高压工程的需求。因此需要构建合理的社会效益评估指标体系及方法, 才能对特高压工程进行全面的评价, 为项目的方案论证提供科学依据。

结合特高压电网的工程实际情况, 可以从特高压电网的直接、间接两个方面梳理出特高压电网的社会效益评估模型。本文首先通过构建特高压电网

社会收益评估指标体系和社会成本评估指标体系, 然后在向负荷中心输送相同电能的前提下采用特高压输电、500 kV 输电与 500 kV 输电和输煤到负荷中心再转化为电能相结合三种方案的收益与成本的差值得到三种方案的直接社会效益, 并对三种方案进行对比分析得到特高压输电相对于另两种方案所取得的间接社会效益, 最后通过算例分析验证了评估方法的准确性、全面性、合理性。

## 1 社会效益评估模型

特高压电网的社会效益评估有别于其他社会效益评估, 本文考虑特高压电网工程实际和社会效益评估的特殊性, 从纵向和横向两个方面对特高压电网进行社会效益评估。其中纵向方面通过对三种方案输电的社会收益和社会成本进行对比分析得到三种方案所取得直接社会效益, 同时对三种方案的直接社会效益进行横向评估得到特高压电网相对于另两种方案所取得的间接社会效益。采用纵向和横向两种评估方法, 通过纵向评估能突出社会效益评估的特殊性, 其评估有别于经济效益评估, 采用横向评估能突出增量部分符合经济学原理。

从纵向和横向两个方面对特高压电网进行社会效益评估, 并结合特高压电网的工程实际, 在对特高压电网进行综合全面调研的基础上, 对特高压输电从环境、能源、土地和人力资源四个社会性指标进行成本分解, 构建直接社会成本评估指标体系; 然后从可听噪声降噪、停电社会损失两个方面构建间接社会成本评估指标体系; 最后从创造产业和就业收益两个方面构建社会收益评估指标体系。从而根据构建的社会成本和社会收益评估指标体系得到特高压电网社会效益评估模型如图 1 所示。

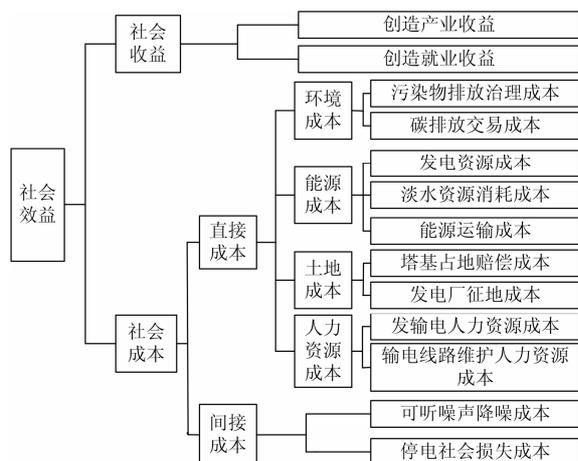


图 1 特高压电网社会效益评估模型

Fig. 1 Social benefit estimation model for UHV grid

从而可以得到特高压电网的社会成本为

$$E_c = \sum_{i=1}^4 \sum_{k=1}^{I_k} E_{ik} + \sum_{i=1}^2 E_{li} \quad (1)$$

式中:  $I_k$  表示第  $i$  个直接成本的个数;  $E_{ik}$  表示第  $i$  个间接成本的第  $k$  个成本;  $E_{li}$  表示第  $i$  个间接成本。

特高压电网的社会收益为

$$E_s = E_{s1} + E_{s2} \quad (2)$$

式中,  $E_{s1}$ 、 $E_{s2}$  为创造产业收益和创造就业收益。

从而可以得到直接社会效益为

$$E = E_s - E_c \quad (3)$$

## 2 社会收益评估指标体系

### 2.1 创造产业效益

按照负荷中心 1 kWh 电能可以创造的平均产值和输送到负荷中心的电能得到产业效益为

$$E_{s1} = S_{we0} \times c_c \quad (4)$$

式中:  $c_c$  为 1 kWh 电能创造的平均产业效益;  $S_{we0}$  为能源基地输送到负荷中心的电能。

### 2.2 创造就业效益

就业效益包括直接就业效益和间接就业效益两部分。其中, 直接就业根据中国社会科学院人口所测算方法得到在当前投资结构下, 1 万亿投资可以创造出 1 159 万个就业岗位, 每个就业岗位按照我国的人均国民收入计算, 可以得到直接就业为

$$E_{s2z} = T_{tou} \times \overline{N_{tou}} \times \overline{c_r} \quad (5)$$

式中:  $T_{tou}$  为输送  $S_{we0}$  电能到负荷中心的投资费用;  $\overline{N_{tou}}$  为单位投资的就业人数;  $\overline{c_r}$  为人均国民收入。

间接就业效益指输送电能到负荷中心解决用电欠缺问题而带动的就业人数, 其间接就业效益为

$$E_{s2j} = S_{we0} \times c_c \times \eta \quad (6)$$

其中,  $\eta$  为我国人均创造价值与人均国民收入比值。

## 3 社会成本评估指标体系

### 3.1 直接社会成本评估指标体系

环境污染成为制约当今经济发展的重要因素, 减少污染物排放是保护环境、建设环境友好型社会和实现中国梦的重要组成部分, 特高压电网能减少环境污染排放, 节约大量的环境成本。环境成本包括治理碳排放交易成本和污染物排放治理成本。其中碳排放交易成本包括输电过程、输煤过程中交通工具和输煤过程中煤炭遗落的碳排放和发电厂  $\text{CO}_2$  排放交易成本四部分, 治理污染物排放成本主要是火电厂发电过程中的  $\text{NO}_x$ 、污水和烟尘排放成本。

$$E_1 = (F_T + F_L + F_L + S_{we} m_0 k_1) c_1 + S_{we} (m_0 k_2 c_2 + k_3 c_3 + m_0 k_4 c_4) \quad (7)$$

式中:  $F_T, F_L, F_L$  为输电、输煤交通工具、遗落煤炭的碳排放量<sup>[6]</sup>;  $c_1$  为  $CO_2$  交易基准价格;  $S_{we}$  为发电量;  $k_1, k_2, k_3, k_4$  分别为  $CO_2, NO_x$ 、污水和烟尘的换算系数<sup>[7]</sup>; 根据单位标煤燃烧产生的  $CO_2, NO_x$ 、污水和烟尘排放量进行折算;  $c_2, c_3, c_4$  分别为收费标准<sup>[7]</sup>;  $m_0$  为发 1kWh 的耗煤量。

我国是一个一次化石能源与淡水资源相对缺乏的国家, 加上我国能源基地与负荷中心呈逆向分布, 使得我国如果将能源直接输送到负荷中心不仅造成能源浪费, 而且加剧交通运输压力, 不利于我国建设一个资源节约型社会。因此降低能源成本有利于社会的可持续发展, 特高压电网的建设能很好的解决上述问题。而特高压电网的能源成本包括能源运输成本、淡水资源消耗成本和发电资源消耗成本三部分。其中能源运输成本包括输电和输煤成本。

$$E_2 = EP_{L1} + EP_{m1} = S_{we1} r p_{ie} + \sum_{i \in I_N} (S_{we} - S_{we1}) m_T c_{I_N} \eta_i \quad (8)$$

式中:  $EP_{L1}, EP_{m1}$  分别为输电和输煤成本;  $S_{we1}$  为通过输电线路向负荷中心输送的电能;  $r$  为火电输电量占总电量的比例;  $p_{ie}$  为单位输电量的生命周期成本;  $I_N$  为交通工具;  $c_{I_N}$  为交通工具  $i$  的单位运输成本;  $\eta_i$  为交通工具  $i$  运输煤炭总量的比例;  $m_T$  为发电端化石燃料的平均发电煤耗。

淡水资源消耗成本为

$$E_3 = S_{we} \times V_s \times c_s \quad (9)$$

式中:  $V_s$  为单位发电耗水量;  $c_s$  为单位水的价格。

发电资源成本包括输煤损耗成本和输电损耗成本和发电厂发电耗煤成本三部分组成。

$$E_4 = \sum_{i \in I_N} \mu_i L_i m c_L + \sum_{i=1}^{N_0} \lambda_i L_i S_{we} \Delta c_L + S_{we} m_0 c_{m0} \quad (10)$$

式中:  $\mu_i$  为交通工具  $i$  运输煤炭的单位距离遗撒率;  $\lambda_i$  为每百千米线路损耗率;  $m$  为能源基地输送到负荷中心的煤炭质量;  $c_L$  为能源基地与负荷中心煤炭价差;  $\Delta c_L$  为与输电距离有关的线损电价<sup>[8]</sup>;  $c_{m0}$  为单位质量煤炭单价;  $N_0$  为输电线路数量。

我国是一个人多地少的土地资源匮乏的国家, 土地资源对于我国经济的可持续发展具有重要意义。特高压电网的土地成本包括塔基占地赔偿成本和发电厂征地成本两部分。其中, 输电线路塔基赔偿成本采用工程经验和实际情况得到, 其成本为

$$E_5 = L_L \times K_G \times S_G \times M_S \quad (11)$$

式中:  $L_L$  是参照在建工程可研或初步设计线路长度;  $K_G$  是每千米塔基数;  $S_G$  是平均每基铁塔通过试验指导设计占地面积;  $M_S$  是土地占用赔偿标准。

第  $i$  个发电厂征地成本为

$$E_6 = \sum_{i=1}^N c_i \times M_i \times R_i \quad (12)$$

式中:  $c_i$  为第  $i$  个能源基地或负荷中心单位土地价格;  $M_i$  为第  $i$  个发电厂单位容量的占地面积;  $R_i$  为第  $i$  个发电厂的装机容量;  $N$  为发电厂数量。

我国虽然是人口大国, 但我国的技术型人力资源特别是适应特高压电网发展的人力资源紧缺, 因此降低人力资源成本对于我国特高压电网的发展具有重要意义。人力资源成本包括发输电人力资源成本和输电线路维护人力资源成本。

$$E_7 = S_{we} \times n_0 \times \bar{c}_f + \sum_{i \in I_N} n_{i0} \times \eta_i \times m_0 \times S_{we} \times \bar{c}_{yi} \quad (13)$$

式中:  $n_0$  为发 1kWh 需要的工作人员数量;  $\bar{c}_f$  为发电厂工作人员平均工资;  $n_{i0}$  为交通工具  $i$  单位运煤工作人员数;  $\bar{c}_{yi}$  为交通工具  $i$  的运输人员平均工资。

输电线路维护人力资源成本是指对输电线路树木进行砍伐以及检修的人力资源成本, 其成本为

$$E_8 = \sum_{i=1}^n c_k \times L_i \times \lambda_k + n_w \times L_i \times c_w \quad (14)$$

式中:  $c_k$  为输电线路单位长度砍伐所需人力资源成本;  $\lambda_k$  为砍伐树木部分线路占线路全长的比例;  $n_w$  表示单位输电线路长度的维修人员的数量;  $c_w$  指运行维修人员的平均工资。

### 3.2 间接成本评估指标体系

根据国际上调查研究显示, 输电线路可听噪声在 52.5 dB(A) 以下基本无投诉, 52.5~59 dB(A) 有少量投诉, 59 dB(A) 以上有大量投诉<sup>[9]</sup>。因此, 当输电线路的噪声达到 52.5 dB(A) 时需进行降噪处理。国内外对输电线路可听噪声进行了大量研究, 文献[10]运用灰色关联分析对影响可听噪声的环境因素、地理参数、导线结构参数等 13 个因素进行简化分析, 从而对超高压输电线路的可听噪声进行预测; 文献[11]基于镜像法并结合优化模拟电荷法提出可用于计算复杂地形情况下特高压直流输电线路可听噪声的方法, 能够为特高压直流输电线路经过复杂地形时的规划提供设计技术参考, 文献[12]通过对单相导线进行叠加来计算整个线路的噪声, 并采用不同的公式进行计算, 通过与实际情况进行对比分析得到 BPA 公式具有更能反映实际情况。

$$SLA = \begin{cases} 120 \lg g + 26.4 \lg n + 55 \lg d - \\ 11.4 \lg D - 128.4 & n \geq 3 \\ 120 \lg g + 55 \lg d - 11.4 \lg D - 115.4 & n < 3 \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $g$  为最大电位梯度平均值;  $n$  为分裂导线根数;  $d$  为分裂导线直径;  $D$  为观测点到电晕点的距离。为了降低输电线路的可听噪声, 通常采用增加分裂导线的直径、增加分裂导线的数目、增加分裂导线的分裂间距和增加导线的对地平均高度 4 种方法来实现, 但是增加铁塔高度成本太大, 经常很少采用。这样可得到降低 1 dB(A) 需要的费用为

$$E'_9 = \min \{e_1, e_2, e_3\} = \min \left\{ \sum_{i=1}^{N_0} L_i \times (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \times n_1, \right. \\ \left. \sum_{i=1}^{N_0} L_i \times \varepsilon_1 \times (n_2 - n_1), \sum_{i=1}^{N_0} L_i \times (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \times (n_2 - n_1) \right\} \quad (16)$$

式中:  $e_1, e_2, e_3$  分别为增加导线的直径、数目、分裂间距的费用;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  分别为原输电线路和改进后的输电导线单位长度的价格;  $n_1, n_2$  分别为原有输电线路和改进后输电线路的分裂导线的数目。

这样可以得到需要的治理降噪成本为

$$E_9 = \begin{cases} (SLA - [52.5] + 1) \times E'_9 & SLA > 52.5 \\ 0 & SLA \leq 52.5 \end{cases} \quad (17)$$

我国经济持续发展, 能源的安全供应是我国经济发展的重要保障, 文献[11]充分考虑电力系统状态的不确定性的影响从安全性与经济性两个方面进行经济性评估, 文献[12]根据停电次数和每次停电时间并结合历史停电造成的社会损失成本数据得到中断供电时间  $T_i$  造成的停电社会损失成本为

$$E_{10} = \sum_{i=1}^{p_j \times L'_k} E_{i0} \times T_i \times \beta'_i \quad (18)$$

式中:  $p_j$  为输电线路每 100 km/a 的跳闸次数;  $L'_k$  为第  $k$  条输电线路长度的百分之一;  $E_{i0}$  为历史数据单位时间停电造成的社会损失;  $T_i$  为每次停电时间;  $\beta'_i$  为停电地区与历史数据采集地区的相似度。

## 4 算例分析

算例选用某一 1 000 kV 特高压输电工程, 工程建成后每年可向负荷中心输送电能 70.6 亿 kWh, 导线采用  $8 \times \text{LGJ} - 630/45$ , 线路全长 640 km, 从 A(能源基地)到 B 线路长度为 360 km, B 到 C(负荷中心)段线路长度为 280 km, 工程静态投资 57 亿元。

### 4.1 社会收益评估

在向负荷中心输送 70.6 亿 kWh 电能(下同)的情况下, 依据 1 kWh 电能可创造 3.943 元产业收益以及中国社会科学院关于投资与就业人数推算结果、

人均国民收入、人均社会价值和 1 kWh 电能所创造的社会收益, 按照社会收益评估指标计算得到三种方案所取得的社会收益如表 1 所示。

表 1 社会收益

Table 1 Social income

	万元		
	产业效益	直接就业收益	间接就业收益
收益	2 466 058	280 724	222 701

### 4.2 社会成本评估

已知 1 000 kV 和 500 kV 每百千米线损率分别为 0.277%、0.7%, 输电线路电场强度分别为 7.171 kV/m 和 1.457 kV/m, 在居民区的塔高分别为 25 m 和 14 m, 分裂子导线之间的距离分别为 400 mm 和 375 mm, 输电走廊分别为 20 m 和 13 m, 线路综合故障跳闸率为 0.15 次/(100 km·a) 和 0.20 次/(100 km·a), 每发 1 kWh 需要标煤 310 g, 1 000 kV 输电线路输电能力是 500 kV 输电能力的 4.5 倍及以上, 本文取 4.5 倍, 据美国全球观察研究所统计 10 kWh 火电发电量需要 100 到 116 人, 本文取 116 人。假设从 A 输煤至 C 采用公路运输 40 km, 铁路运输 600 km, 结合我国实际采用铁路运输 60%煤炭量, 公路运输 40%煤炭量, 淡水费用按 1.5 元/m<sup>3</sup> 计算。根据上述基本参数按照本文提出的直接社会成本评估指标计算得到三种方案的直接成本如表 2 所示。

表 2 直接成本

Table 2 Direct social costs

		万元		
		方案一	方案二	方案三
环境成本	碳排放成本	46 745	48 072	46 494
	污染物治理成本	7 817	8 039	7 759
能源成本	能源运输成本	35 791	36 807	65 463
	淡水资源消耗成本	4 312	4 435	4 280
土地成本	发电资源成本	78 041	80 597	78 623
	塔基占地赔偿成本	4 758	19 726	4 383
人力资源成本	发电厂征地成本	18 148	18 662	23 549
	发输电人力资源成本	5 505	5 653	5 443
合计	输电线路维护人力资源成本	1 565	4 579	1 018
		202 682	226 560	237 012

从间接社会成本角度分析, 方案二的可听噪声大于 52.5 dB(A), 需要对其进行降噪处理以避免被投诉, 通过式(16)计算得到最低降噪成本为 205 万元; 并假设输电线路每次停电需要 1 h 才能恢复供电, 负荷中心与历史停电地区相似度取为 0.4, 这样

可以根据本文提出的间接社会成本指标计算得到间接社会成本如表 3 所示。

表 3 间接成本  
Table 3 Indirect social costs

	万元		
	方案一	方案二	方案三
可听噪声降噪成本	0	205	0
停电社会损失成本	17 684	39 774	8 839
合计	17 684	39 979	8 839

### 4.3 社会效益评估

通过对三种方案的社会成本与社会收益进行对比分析,根据 4.1 节与 4.2 节计算的社会收益与社会成本评估结果并结合本文提出的社会效益评估模型得到 3 种方案所取得的社会效益如表 4 所示。

表 4 社会效益  
Table 4 Social benefit

	万元		
	方案一	方案二	方案三
社会成本	220 366	266 539	248 496
社会收益	2 969 483	2 969 483	2 969 483
社会效益	2 749 117	2 602 944	2 723 632

从表 4 可以看出,方案一的社会成本低于方案二和方案三,同时对比分析表 2 和表 3 得出 3 种方案的同一社会成本值不同,说明需要对特高压电网的社会成本进行细分才能真实准确的评估其社会成本,以便根据其成本关系制定相应的方案以降低其社会成本;从社会收益看,由于 3 种方案输送相同电能到负荷中心,使得 3 种方案的社会收益相同。对比表 4 中的社会成本与社会收益得到 3 种方案的直接社会效益,且方案一的直接社会效益高于方案二和三,并都取得不错的社会收益;对比 3 种方案的社会效益可以得到方案一相对于方案二和三所取得的间接社会效益能够突出其经济性。

## 5 结论

基于特高压电网的工程实际,本文从一个新的角度,构建特高压电网社会成本评估指标体系和社会收益评估指标体系,根据成本与收益的差值得到社会效益评估模型,然后对 3 种方案的社会效益进行对比评估得到特高压输电相对于另两种方案所取得的社会效益,从而可以得到以下结论:

从环保、能源、土地和人力资源 4 个方面构建特高压电网直接社会成本评估指标体系,从可听噪声降噪、停电社会损失两个方面构建间接社会成本评估指标体系,从而较系统、全面地构建了特高压电网社会成本评估模型,从产业和就业两个方面构

建社会收益评估指标体系,从而较系统全面地得到社会效益评估模型。从算例分析看出,该评估模型能够全面科学地评估特高压电网的社会效益。

### 参考文献

- [1] 张宁,刘静琨.影响特高压电网运行的因素及应对策略[J].电力系统保护与控制,2013,43(1):109-114.  
ZHANG Ning, LIU Jingkun. The ultra-high voltage grid risk analysis and its assessment framework[J]. Power System Protection and Control, 2013, 43(1): 109-114.
- [2] 王晓晖,张粒子,程世军.多元电力系统中抽水蓄能的经济性问题研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(4):8-15.  
WANG Xiaohui, ZHANG Lizi, CHENG Shijun. Economic analysis of pumped-storage unit in electricity system with multi-type power sources[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 8-15.
- [3] MARK M G, BILL R. Economic evaluation of power quality[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(2): 8-12.
- [4] 张勇军,黄慧,唐捷.基于非序贯蒙特卡洛冰灾重现期线路经济性比较[J].电力系统保护与控制,2010,38(13):119-123.  
ZHANG Yongjun, HUANG Hui, TANG Jie. Economy comparison of line's ice disaster cycle based on non-sequential Monte Carlo[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 119-123.
- [5] 杨昊,王丹,刘涤尘.特高压交流输电模型的建立与经济性优选分析[J].电力系统保护与控制,2015,43(3):91-96.  
YANG Hao, WANG Dan, LIU Dichen. Establishment of UHV AC transmission model and economical optimization strategy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 91-96.
- [6] 康重庆,周天睿,陈启鑫,等.电网低碳效益评估模型及其应用[J].电网技术,2009,33(17):1-7.  
KANG Chongqing, ZHOU Tianrui, CHEN Qixin, et al. Assessment model on low-carbon effects of power grid and its application[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 1-7.
- [7] 董力通.电力市场下我国实行可再生能源配额制的研究[D].北京:华北电力大学,2006:48-55.  
DONG Litong. Research on the mechanism of RPS executed in China[D]. Beijing: North China Electric

- Power University, 2006: 48-55.
- [8] 丁伟, 胡兆光. 特高压输电经济性比较研究[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 7-13.  
DING Wei, HU Zhaoguang. The research on the economy comparison of ultra high voltage[J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 7-13.
- [9] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [10] 李永明, 王玉强, 徐禄文, 等. 应用灰色方法预测超高压输电线路的可听噪声[J]. 高压电器, 2015, 51(9): 22-27.  
LI Yongming, WANG Yuqiang, XU Luwen, et al. Prediction of audible noise for EHV transmission line based on grey theory[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 22-27.
- [11] 杨滔, 邹岸新, 陈建明, 等.  $\pm 800$  kV 直流输电线临近复杂地形时可听噪声分布特性仿真分析[J]. 高压电器, 2016, 52(8): 14-19.  
YANG Tao, ZOU Anxin, CHEN Jianming, et al. Simulation analysis for audible noise characteristics of  $\pm 800$  kV transmission lines near the complex terrain[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 52(8): 14-19.
- [12] 俞集辉, 杨越, 何健, 等. 对 AC UHV 输电线附近可听噪声预测公式的评估[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 451-456.  
YU Jihui, YANG Yue, HE Jian, et al. Evaluation of audible noise predicting formulas for AC UHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 451-456.
- [13] 冯欣桦, 黎洪光, 郑欣, 等. 计及不确定性的配电网合环点安全性与经济性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 30-37.  
FENG Xinhua, LI Hongguang, ZHENG Xin, et al. Security and economy evaluation of closed loop point of distribution network considering uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 30-37.
- [14] 梁钟晖, 周渝慧, 殷洪凤, 等. 基于模糊理论的输电中断成本估算方法[J]. 电网技术, 2009, 33(1): 71-74.  
LIANG Zhonghui, ZHOU Yuhui, GU Hongfeng, et al. An approach to estimate power transmission interruption cost based on fuzzy theory[J]. Power System Technology, 2009, 33(1): 71-74.

收稿日期: 2015-10-22; 修回日期: 2016-01-07

作者简介:

高 凡(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制, 电力系统规划; E-mail: gfwu@139.com

吴 军(1977-), 男, 通信作者, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制、电力系统规划、电力市场; E-mail: byronwu@whu.edu.cn

刘涤尘(1953-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析与控制、电力自动监控、电力电子技术应用等方面的研究。E-mail: dcliu@whu.edu.cn

(编辑 周金梅)